

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra slévárenství

Slévárenská jádra z anorganických solí
Foundry cores from inorganic salts

Prohlášení

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 6. května 2010

..... Eliška Adamková

jméno a příjmení studenta

..... Nerudova 974, Bohumín 735 81

adresa trvalého pobytu studenta

Poděkování:

Děkuji panu prof. Ing. Petru Jelínkovi, CSc. nejen za odborné vedení, rady a spolupráci, ale především za vstřícné jednání a bohaté zkušenosti. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a mým nejbližším za jejich hojnou podporu v průběhu celého mého studia i během přípravy této bakalářské práce.

Abstrakt:

Bakalářská závěrečná práce se zabývá samotným výzkumem slévárenských jader z anorganických solí. Výběr druhu soli NaCl, KCl a jejich vlastnosti. Mechanické vlastnosti: pevnost v ohybu, navlhavost či odolnost proti vysokým teplotám a podmínky skladování. Optimální složení solné směsi pro slévárenská jádra, ověření možnosti kompozitních skladeb (KCl+ZrSiO₄).

Klíčová slova:

Solná jádra, NaCl, KCl, pevnostní charakteristika, pevnost za tepla, pevnost zbytková

Abstract:

This bachelor thesis discusses a basic research of foundry cores from inorganic salts. There is selection of salts NaCl, KCl, and their properties. Mechanical properties: bending strength, moisture absorption, resistance to high temperatures and storage conditions. The optimum composition of the salt mixture for foundry cores, verification of the possibility of composite compositions (KCl+ZrSiO₄).

Keywords:

Salt cores, NaCl, KCl, strength characteristics, elevated temperature properties, residual strength, retained strength

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	VÝROBA ODLITKŮ ZA POUŽITÍ ROZPUSTNÝCH ANORGANICKÝCH SOLÍ	2
2.1	VÝROBA JADER	7
2.2	SROVNÁNÍ SOLNÝCH A PÍSKOVÝCH JADER:	9
2.3	VÝROBA ODLITKU.....	9
3	VÝBĚR ANORGANICKÝCH SOLÍ (FYZIKÁLNĚ - CHEMICKÉ CHARAKTERISTIKY)	12
4	PODMÍNKY PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ	15
4.1	PODMÍNKY PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	15
4.1.1	Drcení solí.....	16
4.1.1.1	<i>Planetární mlýn</i>	16
4.1.1.2	<i>Tryskový mlýn</i>	17
4.1.2	Vlhčení solí	17
4.1.3	Lisování solí.....	18
4.2	ZKOUŠENÍ VZORKŮ	23
4.2.1	Zkoušení pevnosti v ohybu vylisovaných vzorků.....	23
4.3	MATEMATICKÝ VZOREC PRO PŘEPOČET NAMĚŘENÉHO $\sigma_{0,P}$ NA VÝSLEDNÝ $\sigma_{0,Z}$	24
4.3.1	Výsledky zkoušek	26
4.3.1.1	<i>Primární pevnost za studena</i>	27
4.3.1.2	<i>Pevnost za tepla a zbytková</i>	31
5	GRANULOMETRIE SOLÍ A PODMÍNKY SKLADOVÁNÍ NA PEVNOST V OHYBU	34
5.1	GRANULOMETRIE SOLÍ	34
5.2	VLIV VLNKOSTI NA PEVNOST V OHYBU	36
5.2.1	Navlhavost solí.....	36
6	NÁVRH OPTIMÁLNÍHO SLOŽENÍ SMĚSI SOLÍ.....	38
7	ZÁVĚR.....	40
8	POUŽITÁ LITERATURA:	41

1 ÚVOD

Nedílnou vlastností člověka je snaha nalézt si vždy nejjednodušší cestu k řešení problému. Během dějin se společnosti podařilo vyvinout „zlepšováky“, které usnadňovaly řešení problémů jejich doby, jako byly například akvadukty ve starověkém Římě pro distribuci vody, středověké katapulty využívané k snadnějšímu dobití hradeb, nebo ruchadlo Bratří Veverků pro usnadnění orby v období vrcholného novověku. Všechny tyto zlepšováky lze nazvat souhrnně vynálezy.

Jelikož je dnešní společnost z velké části závislá na automobilovém průmyslu, který je založen především na slitinách neželezných kovů, jako jsou slitiny hliníku a hořčíku, je zcela logické, že naléhavost na zjednodušení řešení realizace těchto součástí se stala velice významnou. Proto se hledal způsob, jak zajistit možnost snadného odlévání takto přesných odlitků s důrazem na hladkost povrchu. A tak spatřila světlo světa jedna z nových technologií – slévárenská jádra z anorganických solí. Jejich hlavním účelem bylo snadné odstranění jádra z dutiny odlitku, což při běžných pískových jádrech znamenalo práci navíc a také ekologická stránka odstraňování i lití byla závadná. A to nemluvíme o tom, zda vůbec šla tato písková jádra z dutiny odstranit. Před dobou vzniku této technologie se na ekologickou stránku moc nehledělo, avšak v posledních letech se stal i ekologický problém velice podstatným. Proto se opět hledalo řešení, které by odstranilo zmíněné nedostatky. Tímto řešením se stala solná jádra. Jejich hlavní předností jsou právě snadné odstranění pouhou vodou či rekrystalizací soli při úplné ekologické nezávadnosti. Nicméně i tato technologie má své nedostatky. Proto se v současné době hledají nejvhodnější typy solí, jejich kompozity či způsoby zpracování, po kterých by jádra vykazovala nejlepší vlastnosti v pevnostech, skladovatelnosti či rozpustnosti. Zda-li se podaří nalézt ideální typ soli pro všechna použití či více typů pro různé aplikace, je otázkou. Nicméně, už nyní se můžeme zaměřit na ty, co jsou již dostupné a z nich zvolit nejvhodnější řešení.

Cíl závěrečné práce: Ověřit fyzikálně – chemické podmínky ovlivňující mechanické vlastnosti jader, vyráběných vysokotlakým lisováním z anorganických solí (NaCl, KCl).

2 VÝROBA ODLITKŮ ZA POUŽITÍ ROZPUSTNÝCH ANORGANICKÝCH SOLÍ

První průmyslové aplikace se solnými jádry sahají do 70. let minulého století, kdy byla jádra z tavené soli vkládána do vhodných odlévacích forem. Od počátku 90. let byla lisovaná jádra na bázi NaCl používána při výrobě vysoce namáhaných pístů dieselových motorů (obr. 1). Toto provedení se mezitím tak rozšířilo, že jádra byla produkována a nasazována ve velkém měřítku.

Příkladem masivnosti je firma Emil Miller s.r.o. patřící do skupiny Ceram-Tec a.s., která dodala v minulých letech do sléváren přes 50 milionů solných jader [1].



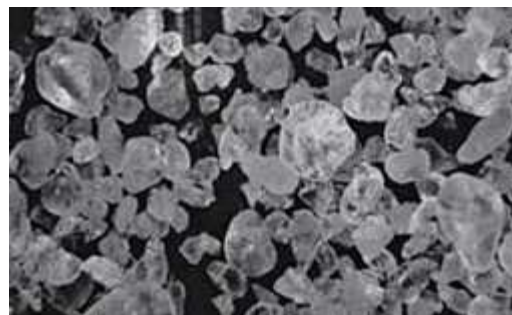
Obr. 1. Vysoce namáhaný píst motoru spolu se solnými jádry [11]

K odlévání dutých forem se všeobecně používala písková jádra. Následně po několika letech se začala při odlévání do kokil používat solná jádra. Hlavním důvodem pro používání solných jader namísto pískových je snadná odstranitelnost i v těžko přístupných místech či geometricky úzkých kanálech. Díky rozpustnosti soli ve vodě je zajištěno, že jsou jádra po odlití bezproblémově odstraněna. Navíc odlévání a odstraňování solných jader se vyznačuje celkovou bezemisivitou, což je v dnešní době, která klade velký důraz na ekologičnost, čistotu práce a ochranu lidí, velmi vítanou zprávou.

Na rozdíl od pískových jader obsahujících organická pojiva, která při odlévání a odstraňování jádra jsou zdrojem karcinogenních emisí a pyrolýzních produktů. To je vzhledem k ekologii a ochraně pracovníků méně příznivé. Dále jsou písková jádra nerozpustná, jak je možno pozorovat ve srovnávací tabulce. Vlastnosti NaCl a křemenného písku jsou znázorněny na obr. 2, tab. 1.



Obr. 2a. Krystaly soli NaCl



Obr. 2b. Křemenný písek

Obr. 2. Ukázka vlastností krystalů obou materiálů [9]

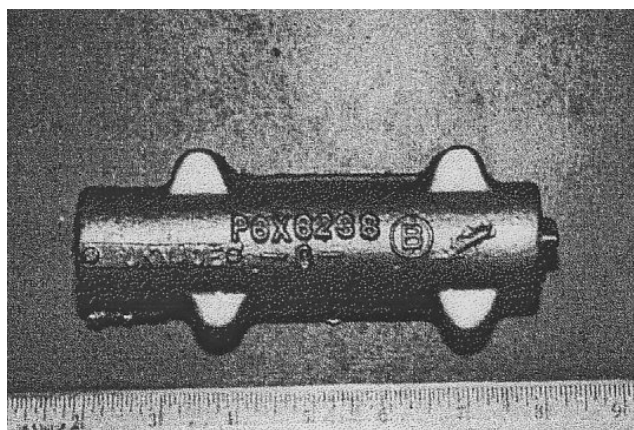
	Sůl	Křemenný písek
Chemický vzorec	NaCl	SiO ₂
Hustota [g/cm ³]	2,16	2,65
Objemová hmotnost [g/cm ³]	1,1 – 1,6	1,6 – 1,9
Teplota tání [°C]	801	1710
Teplota varu [°C]	1465	2230
Rozpustnost ve vodě [g/l]	385	nerozpustný

Tab. 1. Srovnání vlastností NaCl soli a křemenného písku [1]

Technologie solných jader má tyto přednosti:

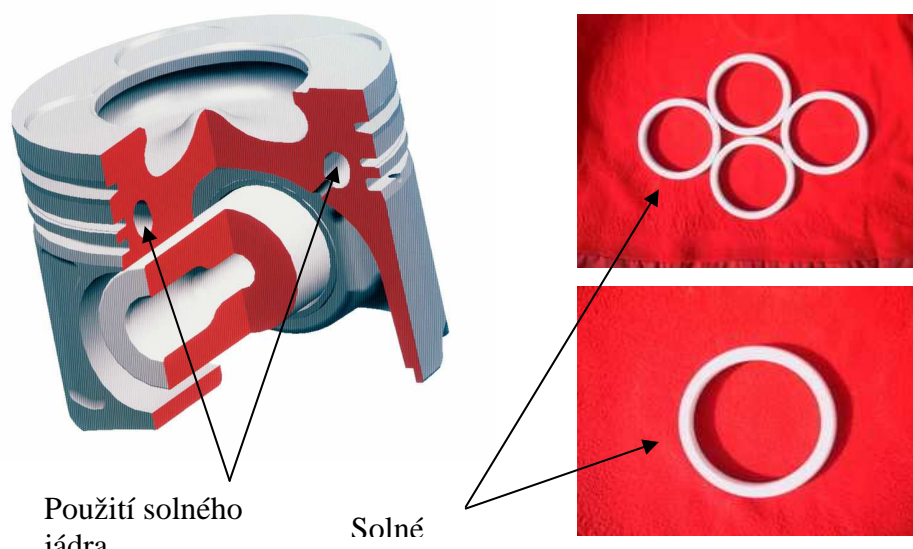
- Odlitky mají hladký povrch bez penetrace kovu.
- Rozměry předlitých otvorů jsou přesné.
- Jádra jsou snadno rozpustná ve vodě.
- Je možno předlévat i pro mechanické čištění těžce přístupné otvory.
- Uzavřený cyklus je šetrný k životnímu prostředí.
- Recyklovatelnost soli z roztoku.
- Solné jádro tolik nedilatuje.

Tato technologie se používá především u slitin hliníku, a to z důvodu teploty tavení čisté soli, neboť ta je pro ostatní vysokotavitelné kovy nedostatečná (tab. 2). Avšak pro Al - slitiny, které jsou odlévány při 650°C je tato teplota postačující. Současný vývoj spěje i k odlévání odlitků z šedé litiny (Třída 25), jako například zkušební tělo ventilu (obr. 3), které bylo vyrobeno za použití sůl – pískové směsi pojené pryskyřicí [3]. Aplikace solných jader je možná jak pro gravitační lití, tak i pro tlakové lití. Především u tlakového lití musíme dbát na dostatečnou pevnost a stálost jader, neboť vlivem tlaku vstříkující se taveniny je vysoce tepelně i mechanicky namáháno a mohlo by u něj dojít k průvalu či k penetraci kovu. Pevnosti solí se dají poněkud zvýšit vytvořením kompozitu. Například přidáním velmi jemných částic $ZrSiO_4$ či Al_2O_3 .



Obr. 3. Odlitek z šedé litiny za použití solného jádra

Dutina v hlavě pístu (obr. 4), vytvořená po odlití, slouží k oběhu chladicího média, které umožňuje dobře odvádět teplo z vysoce namáhaného pístu, a tak jej dostatečně chladit, aby nedošlo k jeho poškození, tzv. zadření. Proto je velký důraz kladen právě na hladkost a čistotu vnitřního povrchu chladicího kanálu. Jako nejvhodnějším materiálem, aby toto dokázal po odlití splnit, jsou právě slévárenská jádra vyrobená z anorganických solí. Ty, jak už bylo řečeno výše, jsou rozpuštěna při styku s vodou. Takto je zajištěno celkové bezesbýtkové odstranění veškerého jádra z dutiny odlitku. Toto by u pískových jader nemuselo být splněno.



Obr. 4. Zobrazení použití solného jádra v pístu motoru [5]

Jako jediná slévárna v ČR, používající technologii vodě rozpustných solných jader k výrobě hliníkových pístů, je firma Almet, a.s. Hradec Králové. Jeden z jejich produktů lze vidět na obr. 5.



Obr. 5. Hliníkový píst firmy Almet, a.s. [6]

Slévárna společnosti odlévá písty metodou gravitačního lití do kovových kokil na plně robotizovaném licím stroji a několika mechanizovaných licích strojích. V případě malých zakázek se provádí lití odlitků pístů i na manuálně ovládaných licích strojích. Požadovaných mechanických vlastností odlitků pístů je dále dosahováno jednostupňovým nebo dvoustupňovým tepelným zpracováním [7].

Ve slévárně jsou vyráběny písty (obr. 6):

- celohliníkové
- se zalitými dilatačními zálitky
- se zalitými nerezistovými nosiči prvního pístního kroužku
- s chladicími dutinami uvnitř pístu (vytvořené vodou rozpustnými nebo kovovými zálitky)



Obr. 6. Jednotlivé typy motorových pístů

2.1 Výroba jader

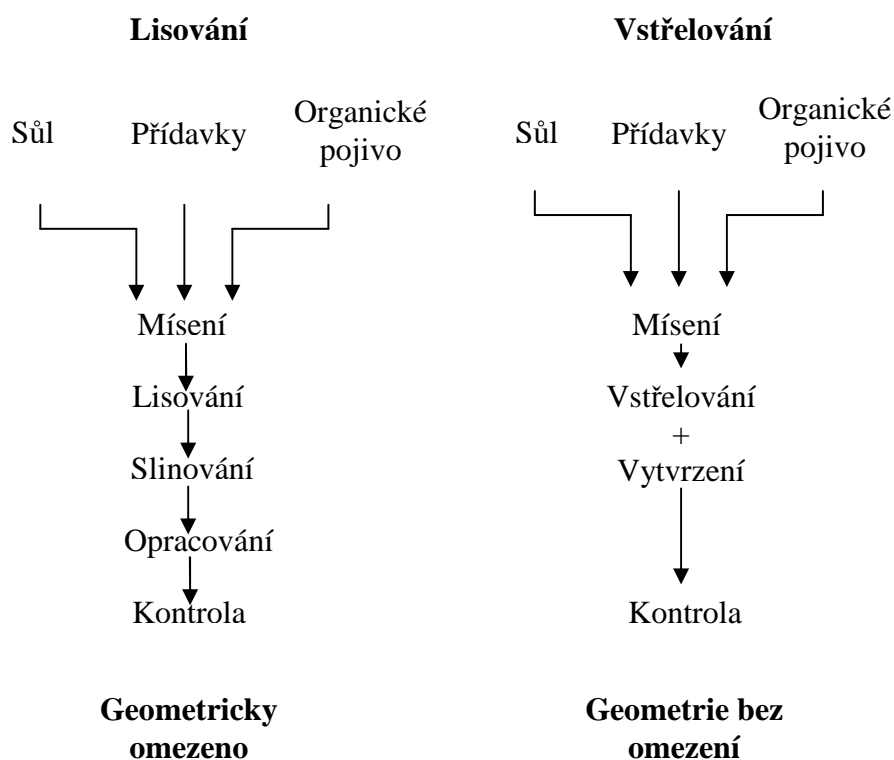
Obecně se pro technologii výroby motorových pístů vyrábí solná jádra s prstencovou geometrií. Tyto tvary se lisují pomocí lisovacích zařízení s vysokými tlaky. Avšak i tato poněkud snadná metoda má svá úskalí. Tento postup dává možnosti výroby jader pouze jednodušších geometrických tvarů. Jiný problém nastává s průřezem jádra, který je tzv. hruškovitého tvaru, jenž s sebou přináší nerovnoměrnosti spěchování po průřezu (obr. 7). Další možností, jak dosáhnout hruškovitého tvaru, je vylisování jádra do hranatého polotovaru s kolmými stěnami, které se následně opracují do požadovaného tvaru (Německo). Tato metoda s sebou přináší rovnoměrnější upěchování celého jádra, avšak předpokládá vysoké primární pevnosti potřebné pro opracování. Další možností výroby jader je vstřelování soli do forem s následným vytvrzením v přítomnosti organického pojiva. Tato metoda přináší zlepšení v podobě tvarové variability.



Obr. 7. Prstenec solného jádra s hruškovitým průřezem [8]

U metody lisování lze realizovat pouze relativně jednoduché tvary. Vlivem požadavků na větší volnost u volby tvaru byla vyvinuta nová metoda vstřelování solných jader. Tím se docílilo vytvoření jakéhokoliv tvaru jádra bez obsahu vody a absolutním bezemisním zpracováním. Tato metoda je podobná nastřelování pískových jader. U lisovaných jader je dosahováno pevnosti pomocí slinování a rekrystalizace. V případě vstřelovaných solných jader je dosaženo pevnosti potřebné pro lící proces pomocí organického pojiva.

Znázornění obou metod výroby solných jader doloženo níže uvedenými obrázky (obr. 8, 9):



Obr. 8. Srovnávací schéma výroby jader [1]

Pro názornost jsou níže uvedeny obrázky solných jader vyrobených metodou lisování a vstřelování soli (obr. 9).



Obr. 9a. Solné jádro vyrobené lisováním [10]



Obr. 9b. Solné jádro vyrobené vstřelováním [9]

2.2 Srovnání solných a pískových jader:

Výhody:

- Solná jádra jsou snadno odstranitelná.
- Bezezbytková odstranitelnost po odlití.
- Ekologičnost procesu odlévání a odstraňování.
- Možnost recyklovatelnosti ze solného roztoku.
- Ochrana obsluhy, neboť nevznikají škodlivé plyny a onemocnění – silikosa.

Za zápor můžeme pokládat poměrně vysokou cenu nákupu surovin oproti křemennému písku, který je u nás poměrně v hojné míře a snadno dosažitelný. Proto je dobré vždy zvážit, pro jaký případ se tato technologie využije. Příkladem lze uvést solná jádra pro výrobu chladících kanálků v pístech motoru, jenž jsou nenahraditelná svými možnostmi. S nároky na přesné vlastnosti a dodržení přísných požadavků těchto pístů mnohdy nelze nahradit solná jádra pískovými.

2.3 Výroba odlitku

Po zhotovení solných jader, jednou z již uvedených technologií, jsou jádra připravena k použití. Na obrázku níže jsou vidět tři otvory v jádře. Tyto otvory slouží k uchycení jádra pomocí zasouvacích háčků, jimiž se zajistí snadné uložení do připravené formy. Takto připravené jádro se předehřeje na teplotu přibližně 450 až 650 °C a teprve poté je vloženo do formy pro odlévání. Předehřívání jádra zabraňuje jeho praskání, které by mohlo být způsobeno náhlou změnou teploty při zalití roztaveným kovem. Hlavně umožňuje lepší zabíhavost kovu. Při odlití je jádro vystaveno enormním teplotám, kterým musí odolat a zachovat si svou pevnost a stálost.



Obr. 10. Otvory pro uchycení [15]

Po kompletaci kokila (forma) – jádro se hliníková slitina či šedá litina odlíje nebo vstřikuje v závislosti na typu technologie. Po zchlazení se z odlitku odstraní jádro. Jádro se odstraňuje působením vody, a to až do úplného rozpuštění. Účinnost tohoto procesu se dá zvýšit ohřátou vodou či jejím zvýšeným tlakem. Je potřeba dbát na důkladný výplach, aby odstranění bylo bezzbytku. Vlivem působící soli by mohl materiál korodovat, což je nepříznivé. Geometrie jádra může být různorodá, jak lze pozorovat na obr. 11.



Obr. 11. Solné jádro složitější geometrie [14]

Mezi odlitky, které využívají technologii ve vodě – rozpustných jader, můžeme zařadit již zmíněné vysoce namáhané písty motorů, které využívají jádra prstencovitého tvaru. Bud' čistě kruhového tvaru či kruhového s přidavnými drážkami. Takovéto jádro je znázorněno na obr. 12, pohled z obou stran.



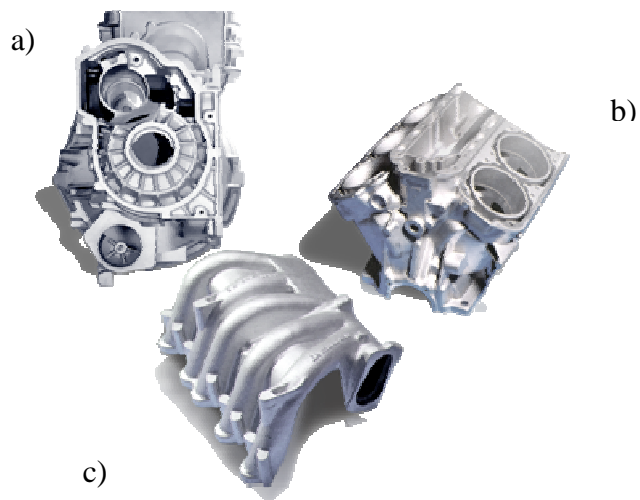
Obr. 12. Prstencové jádro s drážkami [8]

Další příklady výroby odlitků pomocí solných jader jsou uvedeny na obr. 13. Jedná se v převážné míře o odlitky pro automobilový průmysl, kde se vyžaduje vysoká specifická pevnost. Slitiny hliníku tyto požadavky velmi dobře splňují.

Odlitky vyráběné za použití solných jader:



Obr. 13a. Motorové písty [12]



Obr. 13b. a) Skříň převodovky; b) Blok motoru; c) Výfukové svody [13]

3 VÝBĚR ANORGANICKÝCH SOLÍ (FYZIKÁLNĚ - CHEMICKÉ CHARAKTERISTIKY)

Pro přípravu zkušebních vzorků, které byly předmětem této bakalářské práce, sloužily především soli NaCl a KCl, chemické čistoty, Lachner, s.r.o. Neratovice. V minimálním množství pak čistý uhličitán draselný K_2CO_3 , bezvodý. V konečné fázi se jako přísada přidával velmi jemný zirkonsilikát $ZrSiO_4$. Fyzikálně – chemické vlastnosti těchto solí jsou uvedeny v tab. 2.

Vlastnosti solí		KCl	NaCl	K_2CO_3
Molární hmotnost	[g/mol]	74,551	58,443	138,205
Teplota tání	[°C]	770,3	801	891
Teplota varu	[°C]	1411	1413	rozkládá se
Hustota	[g/cm ³]	1,981	2,163	2,29
Rozpustnost ve vodě	[20 °C, g/100 ml]	34,19	35,86	110,5
Krystalová struktura		krychlová	krychlová	Monoklinická jednoklonná
Hrana krystalové mřížky	[pm]	a = 627,7	a = 562,7	

Tab. 2. Fyzikálně – chemické vlastnosti použitých solí

Z chemických rozborů reálných jader některých zahraničních firem vyplynulo, že obě soli NaCl i KCl mají majoritní postavení ve výrobě jader, popřípadě jejich směsi. Obrázek solí (obr. 14).



a)



b)

Obr. 14. Původní krystalická forma a) NaCl, b) KCl

Uschovaný a nedrcený uhličitan draselný se vyznačoval velmi tvrdým až vysušeným kompaktním kusem materiálu, který se složitě rozrušoval na menší kousky. Avšak po drcení v hmoždíři se z uhličitanu draselného stala velmi jemná látka, přecházející při delším drcení až do kašovitého stavu, lepícího se na stěny hmoždíře. Toto se u jiných solí, typu KCl, NaCl, neprojevalo. Obr. 15 znázorňuje rozrušení uhličitanu před drcením v hmoždíři.

Po slisování uhličitanu vykazovala jádra v rozích formy velmi vysokou pevnost, jenž vedla ke komplikaci při odstraňování. Plošky jádra byly také velmi pevné, avšak střed vzorečku byl nekompaktní a mnohdy docházelo k rozlomení již při vyjmutí z kovové formy. Vzorečky, které se podařilo získat, byly zkoušeny, ale pevnosti v ohybu dosahovaly nízkých hodnot a byly charakteristické silným otěrem. Výhodu těchto jader bychom mohli přisoudit snad jen jejich výborné a téměř okamžité rozpustnosti pod proudem vody.



Obr. 15. Uhličitan draselný v částečně rozrušeném stavu

Na obr. 16 lze vidět srovnání vzorku z NaCl a rozdrobené K_2CO_3 při stejných klimatických podmínkách. Uhličitan draselný se vyznačuje velkou hygroskopičností, což lze dokázat skutečností, že i při vlhčení na 1,20 % H_2O prášil.



Obr. 16. Srovnání tělíska z NaCl a rozpadlé K_2CO_3 po stání na vzduchu (nasátí vlhkosti vzduchu)

Z důvodu vysoké hygroskopičnosti jsou vzorky vytvořené z čisté K_2CO_3 nevhodné ke skladování v běžné atmosféře. Toto se však netýká vzorků z chemicky čistých KCl a NaCl. Ty se v průběhu svého odstátí na vzduchu neprojevují touto extrémní destrukcí a zachovávají si svůj charakteristický tvar (obr. 17).



Obr. 17. Vzorky solí při odstátí na vzduchu

4 PODMÍNKY PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

Měření se provádělo na vzorcích $80 \times 22,3 \times h$ mm (obr. 18), kdy výška vzorků byla různá v závislosti na použité lisovací síle a množství navážky ($h = 11,5 \div 12,4$). Tyto vzorky byly lisovány ve speciální kovové formě, kterou pro tento účel vyrobila firma Almet, a.s. Hradec Králové. Její parametry jsou znázorněny na obr. 22. Lisování se odehrávalo na dvou lisech.



Obr. 18. Vylisované zkušební vzorky

4.1 Podmínky přípravy zkušebních vzorků

Přípravy solí spočívaly v jejich drcení, navlhčení a následné homogenizaci v nádobě. Po odstání zhruba jednoho dne před samotným lisováním se sůl použila k tvorbě tělísek. Proces výroby spočíval v navážení předem stanovené hmotnosti soli v závislosti na lisovací síle. Takto připravená sůl se vložila do silikonem separované kovové formy. Zasunula se horní část formy a celý přípravek i se solí se vložil pod lis. Po slisování se forma rozebrala a tělísko odejmulo. Po očištění se vzoreček opět zvážil pro následný výpočet hustoty. Změřila se jeho výška a provedlo se označení vzorku. Označení se provádělo číslicí a písmenem abecedy, pro snazší identifikaci vzorku. Forma se očistila od zbytkové soli, složila do požadovaného tvaru a opět nastříkala silikonem.

4.1.1 Drcení soli

Drcení soli se zpočátku provádělo pomocí hmoždíře, kterým se sůl ručně zjemňovala. Po určité době se provedlo mletí dvou vzorků soli z KCl na planetárním a tryskovém mlýně. Tato zařízení se nachází v Centru nanotechnologií, kde bylo mechanické zpracování vzorků prováděno. U většiny vzorků se již soli nedrtily a užily se ve standardním stavu dodávaném výrobcem.

Jak bylo zmíněno dva vzorky typu KCl byly mechanicky zpracovány na dvou typech mlecího zařízení:

- Planetárním mlýnku.
- Tryskovém mlýně.

4.1.1.1 Planetární mlýn

Planetární mlýn pracuje na principu rotujícího disku nesoucího mlecí nádoby s mlecími koulemi. Nádoby rotují kolem své osy a v opačném směru než nosný disk mlýna. Rotující disk unáší 2 mlecí komory, které jsou spolu s mlecími koulemi vyrobeny z wolfram karbidu (WC). Obě rychlosti rotace jsou v řádech několika stovek otáček za minutu.

Vzorky byly zpracovávány na planetárním mlýnku typu Fritsch Pulverisette 7, mlecí rychlostí 5 (ot/s.). Jako mlecí tělesa byly využity tři mlecí kuličky. Mletí probíhalo po dobu 15 minut (obr. 19).



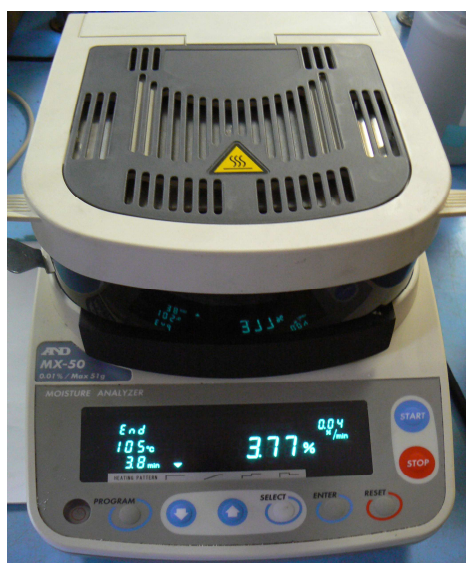
Obr. 19. Planetární mlýn Fritsch Pulverisette 7 [17]

4.1.1.2 Tryskový mlýn

Jeden typ vzorku, který byl zpracován pomocí planetárního mlýna, byl následně tryskově mlet. Tryskový mlýn představuje speciální skupinu mlýnů, která umožňuje připravovat částice s výstupní velikostí v rozmezí 0,5 až 5 μm s neomezenou kapacitou mletého vzorku. Tryskový mlýn zpracovává vzorky použitím plynulé energie mletí s nepohyblivými částmi (mlecími tělesy). Toto zařízení se řadí do skupiny mlýnů s vysokou energií mletí. Jako hlavní zdroj energie mletí v tryskovém mlýně je využíváno stlačeného vzduchu o dvou tlacích: a) mlecím tlaku $p_g = 50 \text{ PSI}$ (350 kPa) a b) tlaku podávacím $p_f = 50 \text{ PSI}$ (350 kPa).

4.1.2 Vlhčení soli

Měření vlhkosti soli se provádělo pomocí analyzátoru vlhkosti značky AND MX – 50 Moisture analyzer znázorněném na obr. 20.



Obr. 20. Analyzátor vlhkosti

Vlhčení spočívalo v rozprostření soli na rovné ploše a pomocí rozprášených kapiček čisté vody se sůl navlhčila. Abychom určili jaká vlhkost se podařila získat, odebral se vzorek přibližně 10 g, který se nechal sušit v analyzátoru při teplotě 105°C. Doba sušení není přesně stanovena. Suší se až do konstantní hmotnosti vzorku. Postupným výzkumem se určila požadovaná vlhkost solí do 1 %. V závislosti na zjištěné vlhkosti se buď provedlo další vlhčení, nebo se sůl dosušila přidáním suché směsi. Měření vlhkosti se provádělo v průběhu celého procesu třikrát. A to při dosahování požadované vlhkosti poté před samotným lisováním i po něm.

4.1.3 Lisování solí

Jak bylo již dříve uvedeno, tělíška byla lisována pod dvěma typy lisů. Ještě v počátcích se lisovalo na přístroji, který dosahoval maximálních tlakových sil $50 \cdot 10^3$ N. Po instalaci nového lisu počátkem roku se již toto lisování provádělo na novém lisu s maximálními silami až $100 \cdot 10^3$ N. Tím se podmínky pro výzkum v mnohém rozšířily. Rychlost lisování se volila ve většině případů 4 mm/min.

Parametry zařízení:

Starší zařízení lisující maximálními tlaky 50 kN je typu INOVA TSM 50. Jedná se o elektromechanické zkušební zařízení.

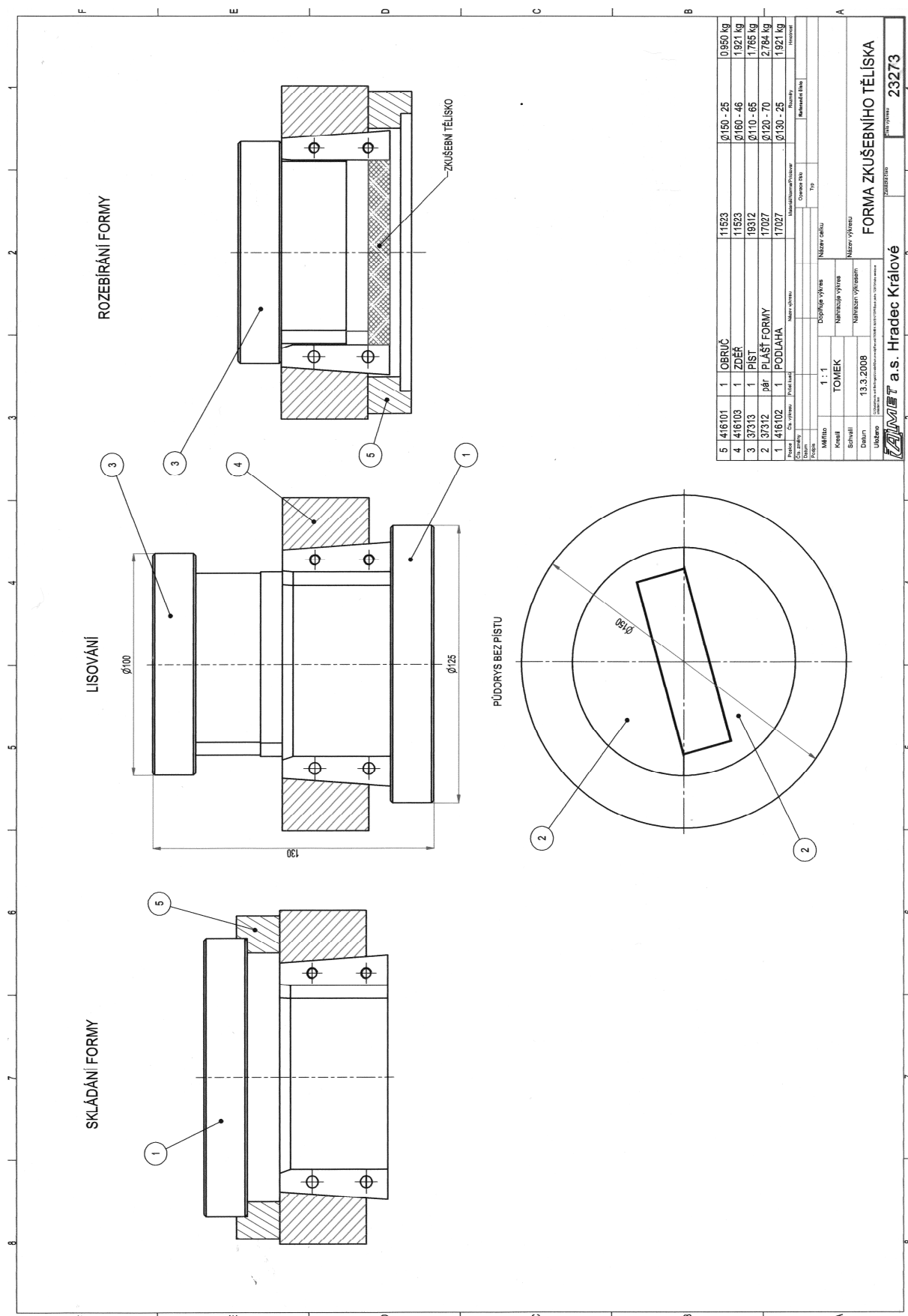
Novější 100 kN lis je univerzální multifunkční servo – hydraulické zařízení LFV 100, vyrobeno firmou Walter + Bai ag, Švýcarsko (obr. 21).



Obr. 21. Nové zařízení

Požadovaný tvar vzorků byl zajištěn pomocí kovové formy, která se umístila mezi čelisti lisu. Vysokými tlaky působící na horní a spodní část formy se sůl vylisovala. Speciální kovová forma je zobrazena na obr. 23, 24.

Průběh lisování lze prostudovat ve zkušebním protokolu (obr. 25), a to jak rychlost zatěžování, působící napětí či křivku zatěžování.



Obr. 22. Parametry kovové formy

Kovová forma je rozložitelná do několika částí tak, aby se zajistilo bezpečné vyjmutí vyliisovaného vzorku. Všechny části do sebe plně zapadají a vytváří tak požadovanou dutinu pro umístění sypkého agregátu. Otvor je uzavřen horní odnímatelnou částí, která kompletuje celou formu.



Obr. 23. Složená forma



Obr. 24. Rozložená kovová forma

ZKUŠEBNÍ PROTOKOL

materiál:

lisování soli

rychlost:

v=4 mm/min

Typ zkoušky:

Kovové materiály, zkouška tahem ČSN EN - 10002-1

Soubor parametrů:

TLAK.WTP

Datum zkoušky:

3.11.2009

Čas zkoušky:

8:41

Vzorek:

V30

Rozměry [mm]:

Rozměr 1

Rozměr 2

Průřez

Jmenovité

80,00

22,30

1784,00

Skutečné

80,00

22,30

1784,00

Výsledky zkoušky:Re
[MPa]

-

ReH
[MPa]

-

Rel
[MPa]

-

Fm
[kN]

49,18

Rm
[MPa]

28,00

A
[%]

-

Z
[%]

-

E
[kN/mm²]

-

At
[%]

-

Agt
[%]

-

Rp 0,2
[MPa]

N/A

Rp
[MPa]

-

Rp
[MPa]

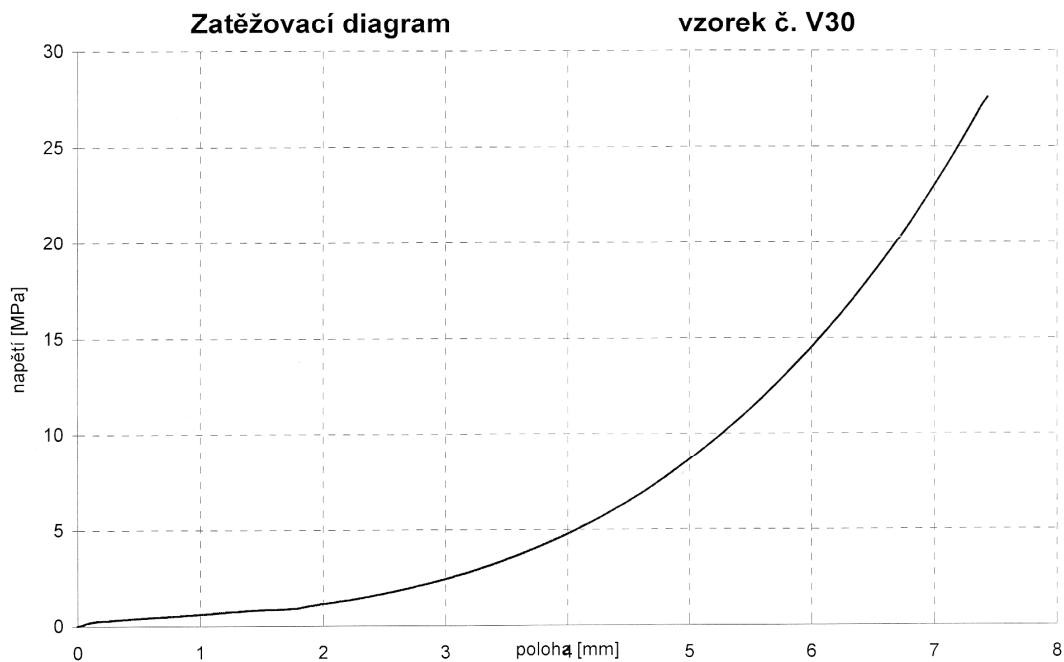
-

Rt 0,5
[MPa]

-

Rt
[MPa]

-



Obr. 25. Zkušební protokol

4.2 Zkoušení vzorků

Po vylisování je část vzorků určena k tepelnému zpracování. Zbytek tělísek se nechává odstát na vzduchu. Ty se posléze zkouší po 24 či 48 hodinách. Žíhání vzorků se provádí při teplotách 650 °C, což prakticky simuluje teplotu lití slitin hliníku. Této teplotě musí tělísko odolávat po dobu 0,5 – 1 hodiny. Při této době žíhání je dokončeno sušení a rekrystalizace.

Mechanické vlastnosti byly hodnoceny:

- Pevnost v ohybu za tepla, kdy se žíhaný vzorek okamžitě zkouší.
- Zbytková pevnost v ohybu, kdy se vzorek po vytažení z pece nechá vychladnout. Po vychladnutí se zkouší.
- Primární pevnost v ohybu, kdy se vzoreček tepelně nezpracovává, nechá se odstát na vzduchu.

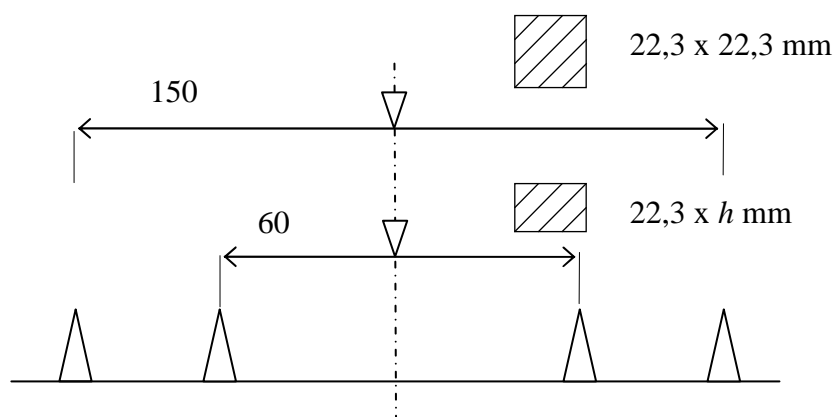
4.2.1 Zkoušení pevnosti v ohybu vylisovaných vzorků

Měření pevnosti bylo prováděno na adaptovaném univerzálním pevnostním přístroji LRu – 2e (MULTISERW Morek, PL). Přístroj se zkoušeným vzorkem je znázorněn na obr. 26. Naměřená hodnota pevnosti v ohybu se musí dále přepočítat.



Obr. 26. Vzorek při zkoušení pevnosti v ohybu [4]

4.3 Matematický vzorec pro přepočet naměřeného $\sigma_{o,p}$ na výsledný $\sigma_{o,z}$



Obr.27. Původní koncept a zkrácená varianta

Původní koncept:

$$\sigma_{o,p} = \frac{M_{o,p \max}}{W_{o,p}} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \frac{L_p}{2}}{\frac{a^3}{6}} = \frac{\frac{F \cdot L_p}{4}}{\frac{a^3}{6}} = \frac{6 \cdot F \cdot L_p}{4 \cdot a^3} = F \cdot \frac{3 \cdot L_p}{2 \cdot a^3} = F \cdot A \quad (\text{N/mm}^2)$$

kde A je $\frac{3 \cdot L_p}{2 \cdot a^3} = \text{konst.} \quad (\text{mm}^{-2})$.

Zkrácená varianta:

$$\sigma_{o,z} = \frac{M_{o,z \max}}{W_{o,z}} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \frac{L_z}{2}}{\frac{a \cdot h^2}{6}} = \frac{\frac{F \cdot L_z}{4}}{\frac{a \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot F \cdot L_z}{4 \cdot a \cdot h^2} = F \cdot \frac{3 \cdot L_z}{2 \cdot a \cdot h^2} = F \cdot B(h) \quad (\text{N/mm}^2)$$

kde $B(h)$ je $\frac{3 \cdot L_z}{2 \cdot a \cdot h^2} \quad (\text{mm}^{-2})$.

Poměr mezi zkrácenou variantou a původním konceptem:

$$\frac{\sigma_{o,z}}{\sigma_{o,p}} = \frac{F \cdot \frac{3 \cdot L_z}{2 \cdot a \cdot h^2}}{F \cdot \frac{3 \cdot L_p}{2 \cdot a^3}} = \frac{F \cdot B(h)}{F \cdot A} = \frac{B(h)}{A} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Výsledný vzorec pro přepočet pevnosti v ohybu:

$$\sigma_{o,z} = \sigma_{o,p} \cdot \frac{B(h)}{A} \quad (\text{N/mm}^2)$$

kde $\sigma_{o,z}$ je pevnost v ohybu přepočtená (N/mm^2),

$\sigma_{o,p}$ - pevnost v ohybu naměřená (N/mm^2),

L_k - délka zkrácené varianty (mm),

L_p - délka původního konceptu (mm),

a - délka hrany vzorku (mm),

h - proměnná výška vzorku (mm).

4.3.1 Výsledky zkoušek

Níže uvedené fotografie byly pořízeny laserovým skenovacím konfokálním mikroskopem Olympus LEXT OLS 3100, který je umístěn na pracovišti CPIT, laboratoř SIMD. Tento mikroskop umožňuje submikronové zobrazení povrchů materiálů s rozlišením 120 nm a schopností přesného 3D měření. Rozsah zvětšení se pohybuje v rozmezí 120x až 14 400x. Mikroskop využívá laserový paprsek k:

- Hodnocení lomových ploch.
- K pozorování 3D povrchů a prostorové rekonstrukce (morfologie, mikrostruktura, povrchové defekty, stopy opotřebení aj.).
- Bezkontaktnímu měření drsnosti.
- Měření parametrů jako je výška, délka, objem, povrch, atd.

Tento mikroskop je znázorněn na obr. 28.



Obr. 28. Laserový skenovací konfokální mikroskop

4.3.1.1 Primární pevnost za studena

- S rostoucí lisovací silou (do 100 kN) roste primární pevnost
- S lisovací silou roste hustota. Tělíška dosahují hodnot okolo $1,9 \text{ g.cm}^{-3}$, což se blíží monolitické soli KCl (zdánlivá pórovitost tělíška 3,58 %).

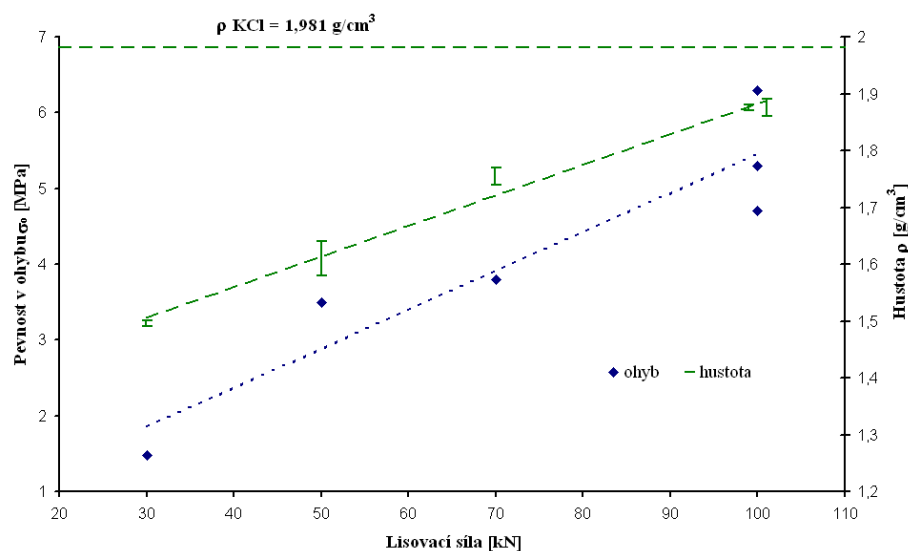
Srovnání primární pevnosti a pevnosti za tepla u KCl a NaCl při konstantní lisovací síle.

Druh soli	Vlhkost soli [%]	Žihání 650 °C [hod.]	Doba skladování [hod.]	Lisovací síla [x 10 ³ N]	Primární* a pevnost za tepla v ohybu 650 °C [MPa]	Hustota vzorku [g.cm ⁻³]
KCl	0,87	1	24	100	6,77	1,86 – 1,88
			72		6,34*	1,86 – 1,89
NaCl	0,83	1	24	100	3,69	1,87 – 1,89
			72		6,35*	1,85 – 1,87

Tab. 3. Srovnání pevností KCl a NaCl při konstantní lisovací síle

Zatímco u KCl se pevnost za tepla výrazně nelišila od primární pevnosti, u NaCl došlo k téměř 50 % poklesu. Rozdílné chování ukazuje tab. 3.

Vliv lisovací síly na pevnost i hustotu tělísek z KCl je znázorněn na obr. 29, přičemž $d_{50} = 190 \mu\text{m}$ a vlhkost 0,87 % směsi.



Obr. 29. Vliv lisovací síly na pevnost v ohybu a hustotu tělísek z KCl

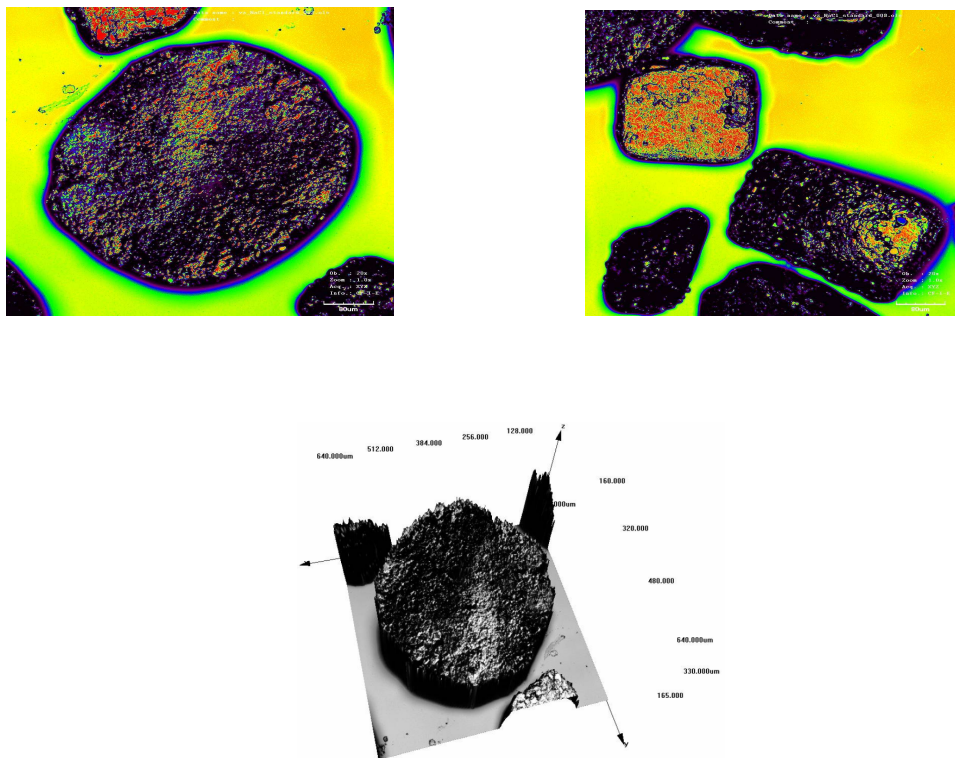
Srovnání primární pevnosti KCl a NaCl v závislosti na různé lisovací síle vyjadřuje tab. 4.

Lisovací síla :	50.10 ³ N		100.10 ³ N	
Lisovací napětí:	28 MPa		56 MPa	
Soli	Pevnost v ohybu	Hustota	Pevnost v ohybu	Hustota
	[N/mm ²]	[g.cm ⁻³]	[N/mm ²]	[g.cm ⁻³]
KCl	4,65	1,682	8,53	1,902
NaCl	1,46	1,687	5,89	1,866
KCl/NaCl (1 : 1)	2,67	1,663	7,30	1,861

Tab. 4. Srovnání primárních pevností v závislosti na lisovací síle [4]

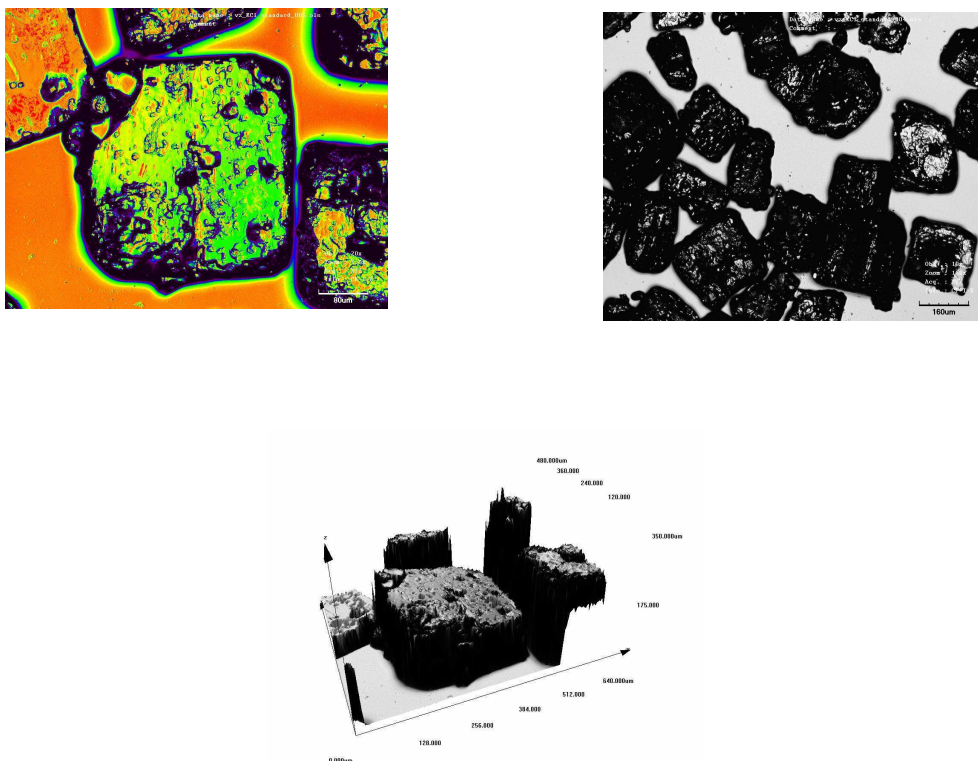
Jak je patrné z tab. 4 jsou primární pevnosti pro NaCl výrazně nižší (pro lisovací sílu 50.10³ N o 68 % , pro 100.10³ N o 31 %) i při srovnatelných hustotách vzorků. Při váhovém poměru solí 1 : 1 jsme obdrželi pevnosti mezi oběmi mezními hodnotami, při stejné hustotě tělísek.

Na fotografii soli NaCl vidíme, že zrna jsou zaoblená, což by mohlo být jednou z příčin nižší pevnosti oproti KCl.



Obr. 30. Mikrostruktura vzorku NaCl

U KCl jsou zrna pravidelná a krychlová (obr. 31). Tento charakter zrn se s velkou pravděpodobností podílí na vyšších pevnostech tělísek z KCl.



Obr. 31. Mikrostruktura vzorku KCl

4.3.1.2 Pevnost za tepla a zbytková

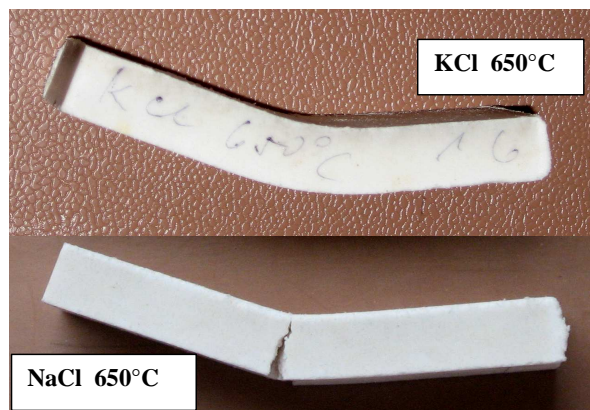
Srovnání primárních a zbytkových pevností KCl i NaCl při různých lisovacích silách a rozdílné vlhkosti (tab. 5).

Druh soli	Vlhkost soli	Žhání 650 °C	Doba skladování	Lisovací síla	Primární* a zbytková pevnost v ohybu	Hustota vzorku
	[%]	[hod.]	[hod.]	[x 10 ³ N]	[MPa]	[g.cm ⁻³]
KCl	1,2	0,5	24	50	3,53	1,58 – 1,64
					3,44*	1,72
				65	5,41	1,71 – 1,75
					4,73*	1,71
	0,87	1,0	24	100	6,35	1,83 – 1,86
			72		6,34*	1,86 – 1,89
NaCl	0,83	1,0	24	100	6,58	1,83 – 1,87
			72		6,36*	1,85 – 1,87

Tab. 5. Srovnání při různých lisovacích silách [4]

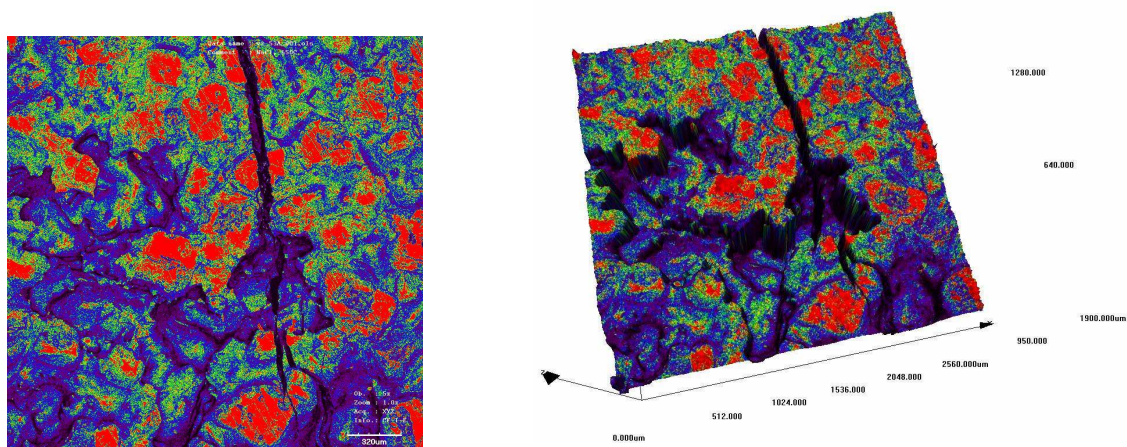
Tabulka uvádí, že s lisovací silou roste zbytková pevnost, jakož i hustota. Zbytkové pevnosti u KCl a NaCl jsou srovnatelné. Primární pevnosti po 24 a 72 hodinách skladování na vzduchu se téměř nelišily od vysokých zbytkových pevností, které dosahovaly až přes 6 MPa v ohybu. Tyto pevnosti již umožňují bezpečné opracování jader.

Tělíska z NaCl pod zatížením praskají, u KCl se dostavuje vyšší plastický stav (obr. 32).



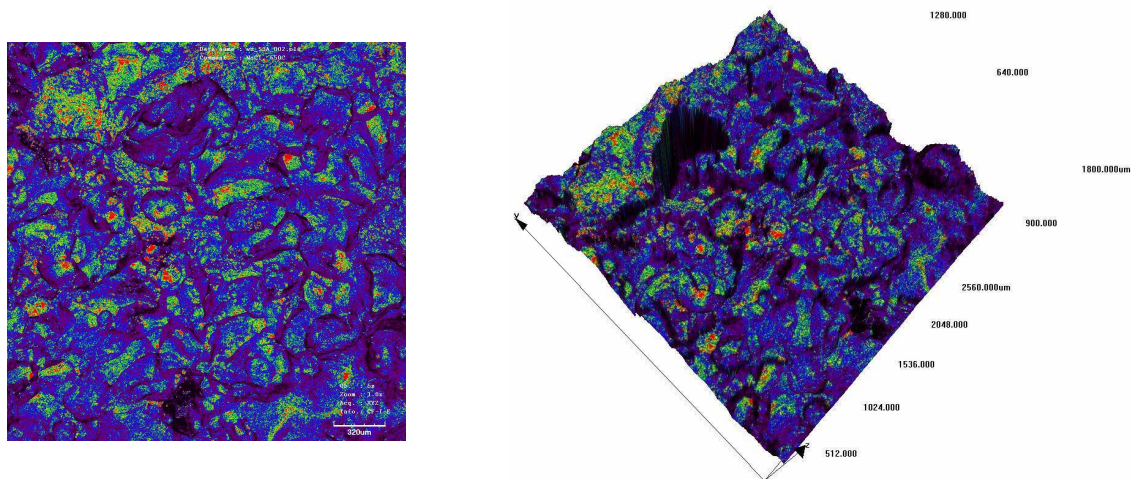
Obr. 32. Plastická deformace KCl a lom zkušebního tělíska z NaCl

Příčiny těchto vlastností můžeme hledat v mikrostruktuře obou solí, jak dokládají následné fotografie. Na obr. 33 je vidět NaCl s pevností za tepla 650°C 3,69 MPa. Trhlina ve struktuře NaCl prochází přes zrna soli.



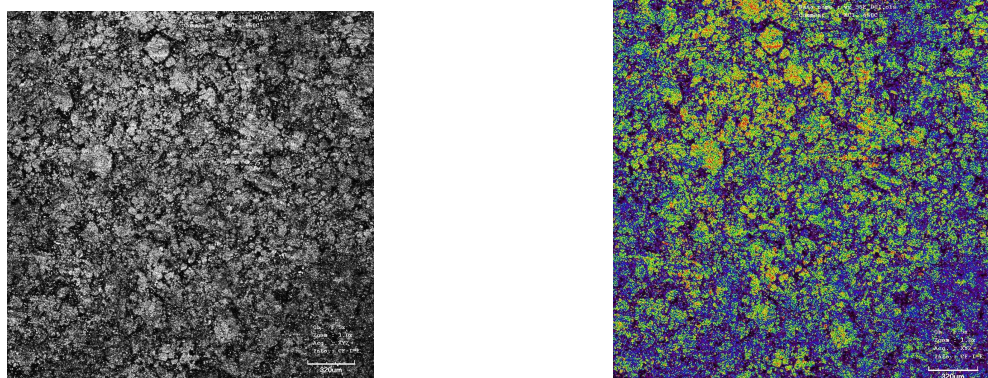
Obr. 33. Trhlina ve vzorku NaCl na povrchu

Povrch vzorku NaCl při pevnostech za tepla není tolik kompaktní jako povrch KCl, jak lze pozorovat na obr. 34 – 35.



Obr. 34. Povrch NaCl při pevnostech za tepla 3,69 MPa
(vznik pórů a mikrotrhlin)

U tělísek z KCl se dosáhlo podstatně vyšších pevností za tepla, a to až 8,38 MPa. Důvody můžeme hledat ve větší kompaktnosti a monolitické struktuře jader ze soli KCl. Z tohoto se dá usuzovat vyšší pevnost oproti NaCl.



Obr. 35. Povrch KCl při pevnostech za tepla 8,38 MPa

5 GRANULOMETRIE SOLÍ A PODMÍNKY SKLADOVÁNÍ NA PEVNOST V OHYBU

5.1 Granulometrie solí

V našem případě byly použity soli buď v původní krystalické formě ($D_{10} = 72,6 - 73,4 \mu\text{m}$, $D_{50} = 188 - 189 \mu\text{m}$, $D_{90} = 367 - 370 \mu\text{m}$), nebo po přemletí na planetárním mlýně ($D_{10} = 16,8 \mu\text{m}$, $D_{50} = 50 - 82 \mu\text{m}$, $D_{90} = 263 \mu\text{m}$). Stanovení se provádělo na přístroji FRITSCH, ANALYSETTE 22 Micro Tc plus v sedimentačním prostředí isopropanolu. Přístroj tohoto typu je znázorněn na obr. 36 [4].



Obr. 36. Stanovení granulometrie pomocí přístroje FRITSCH [16]

Výsledky granulometrie:

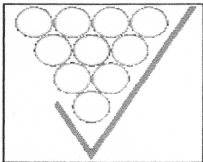
Při ručním drcení v hmoždíři se u vzorečků projevila vyšší pevnost v ohybu oproti standardní zrnitosti soli. Pokud bychom měli srovnávat původní granulometrii s přemletou na planetárním mlýnku, dosáhlo se těchto výsledků:

- D_{50} kleslo z $189 \mu\text{m}$ na $81 \mu\text{m}$.
- Pevnost v ohybu KCl se touto úpravou zvýšila z $4,5$ na $5,7 \text{ MPa}$.
- Došlo k růstu hustoty z $1,66$ na $1,75 \text{ g.cm}^{-3}$.

Další zjemnění vzorku na tryskovém mlýně se projevilo nepříznivými účinky. Pomletý materiál byl tvořen stabilními agregáty částic materiálu (KCl), které vznikají na základě snížení velikosti částic a růstu povrchové energie.

Dalo by se předpokládat, že zjemňování zrn soli povede ke zvýšení pevnosti i hustoty vzorků, avšak tento závěr musí být vyzkoušen jiným postupem, např. rekrytalizací z přesycených roztoků.

U kompozitních směsí byl použit $ZrSiO_4$ $D_{50} = 158,033 \mu m$. Celkový granulometrický rozbor je uveden na obr. 37.

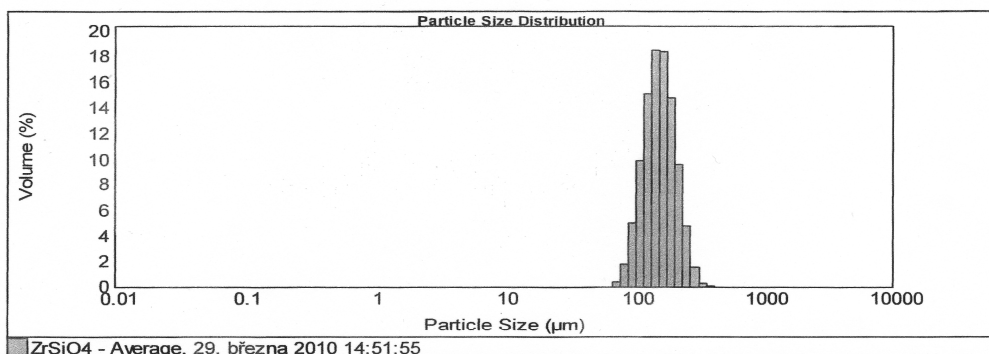


LABORATOŘ SYPKÝCH HMOT

prof. Ing. Jiří ZEGZULKA, CSc.
VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
 Institut dopravy, Fakulta strojní
 17.listopadu 15, Ostrava-Poruba, 708 33
 Tel: +420 59732 4379 Fax: +420 59699 4330 E-mail: jiri.zegzulka@vsb.cz

Výsledky Analýzy

Označení vzorku: ZrSiO4 - Average	Název SOP: default	Měřeno: 29. března 2010 14:51:55	
Zdroj vzorku a typ: Factory = Jelinek, KAT632	Měřil: Brázda Robert	Analyzováno: 29. března 2010 14:51:56	
Sample bulk lot ref: 29.03. 2010	Zdroj výsledku : Averaged		
Název částice: Default	Název příslušenství: Hydro 2000MU (A)	Model analýzy: General purpose	Citlivost: Enhanced
Refrakční index částice: 1.520	Absorpce: 0.1	Rozsah měření: 0.020 do 2000.000 um	Zastínění: 13.33 %
Název dispersantu: Water	Refrakční index dispersantu: 1.330	Váhový rozdíl: 0.628 %	Výsledek emulace: Off
Koncentrace: 0.3079 %Vol	Span (šířka distribuce) : 0.736	Uniformity (jednotnost): 0.231	Jednotky výsledku: Volume
Specific Surface Area: 0.0395 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 151.742 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 163.856 um	Kurtosis: 0.349
d(0.1): 110.012 um	d(0.5): 157.717 um	d(0.9): 226.046 um	d50: 158.033 um



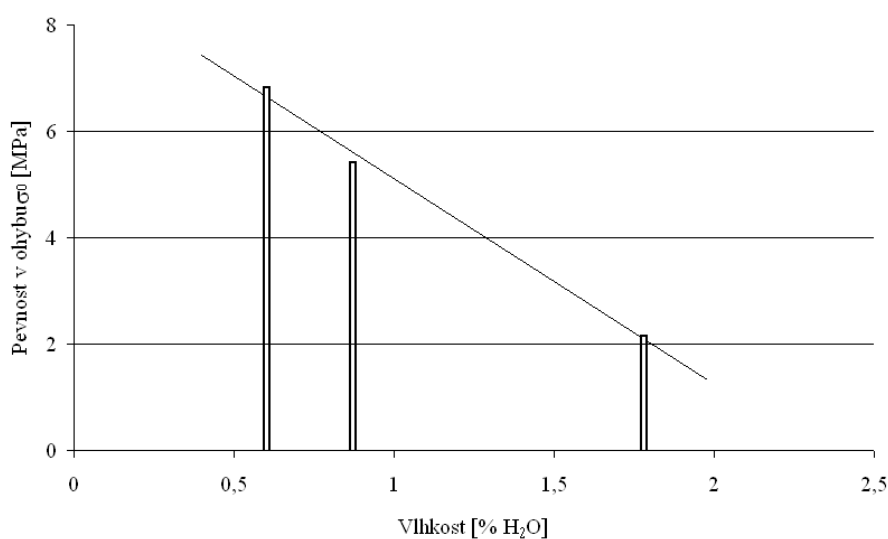
ZrSiO₄ - Average, 29. března 2010 14:51:55

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	15.13	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.183	0.00	138.038	18.51	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.135	0.00	158.489	18.39	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.159	0.00	1.660	0.00	17.378	0.00	181.970	14.82	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.00	208.930	9.58	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	0.00	238.883	4.69	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	0.00	275.423	1.61	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.894	0.00	30.200	0.00	316.228	0.21	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	0.00	363.078	0.01	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	0.00	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	0.00	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	0.00	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	0.00	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.163	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	0.31	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	1.77	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	5.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	9.95	1258.925	0.00		

Obr. 37. Výsledky analýzy $ZrSiO_4$

5.2 Vliv vlhkosti na pevnost v ohybu

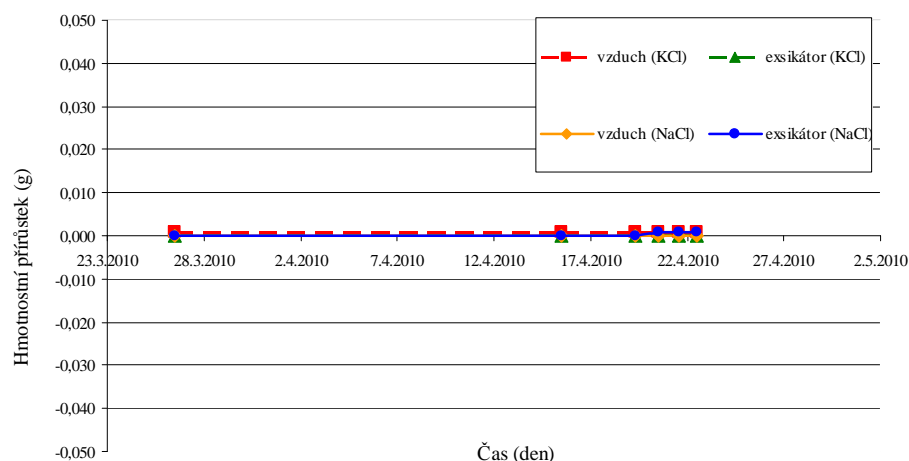
Dá se předpokládat, že vlhkost solí „naleptává“ povrch krystalů a vedle jemnosti zrn napomáhá při lisování k dosažení vyšší hustoty a pevnosti. Výzkum však ukázal, že s rostoucí vlhkostí solí naopak pevnost klesá po 24 hodinách skladování vylišovaných tělísek na vzduchu. Proto je doporučována vlhkost solí pod 1 hm. %. Obr. 38 znázorňuje vliv vlhkosti KCl na pevnost v ohybu (lisovací síla $100 \cdot 10^3$ N, hustota $1,84 - 1,89 \text{ g.cm}^{-3}$, skladování 24 hodin na vzduchu $22 - 23^\circ\text{C}$, relativní vlhkost 60 %).



Obr. 38. Vliv vlhkosti na pevnost v ohybu

5.2.1 Navlhavost solí

V průběhu 14-ti denního měření navlhavosti se měřila závislost změny hmotnosti vzorků soli NaCl a KCl v čase. Celé měření započalo přípravou vzorků na petriho misky. Ty se vložily do žíhací pece, kde se sušily při teplotě 110°C až do konstantní hmotnosti. Hmotnost takto vysušeného vzorku se pokládala za výchozí. V jednom případě se petriho misky s NaCl a KCl vložily do exsikátoru nad hladinu vody, kde se vlhkost pohybovala kolem 53 % při průměrné teplotě 22°C a normálním atmosférickém tlaku. V druhém případě byly tyto misky s obsahy solí ponechány volně na vzduchu s průměrnou vlhkostí vzduchu 25 %, průměrné teplotě 22°C a normálním tlaku. Výsledky jsou znázorněny na obr. 39.



Obr. 39. Časová závislost změny hmotnosti solí pro různé podmínky

Z průběhu lze vidět, že pokud jsou obě chemicky čisté soli ponechány na vzduchu, jsou jejich hmotnosti neměnné. Co se týká solí uložených v exsikátoru lze vidět, že při dané vlhkosti, teplotě a tlaku se jejich hmotnosti také neměnily. Zjištěné výsledky jsou příznivé pro skladovatelnost jader vyrobených z anorganických solí.

Také u vylisovaných vzorků vysoké chemické čistoty solí (KCl, NaCl) při dlouhodobém skladování za běžných atmosférických podmínek, nebyla pozorována navlhavost. Byla testována také zkušební tělíska za extrémních podmínek (98 % relativní vlhkosti) lisovaná silou $50 \cdot 10^3$ N s pevností po 24 hodinách skladování 3,42 MPa. Jejich pevnost klesla k nule, ovšem po odležení 24 hodin na vzduchu (za laboratorních podmínek) se pevnost opět zvýšila na původní hodnoty 3,5 MPa.

6 NÁVRH OPTIMÁLNÍHO SLOŽENÍ SMĚSI SOLÍ

K volbě optimálního složení směsi soli je potřeba sledovat tyto vlastnosti:

- Pevnost po slisování (primární pevnost).
- Skladovatelnost jader.
- Pevnost za tepla (i zbytkovou).
- Rozpustnost ve studené a teplé vodě.
- Pórovitost vzorku.

Vzhledem k těmto kritériím by se jako vhodná směs na slévárenská jádra mohla vybrat sůl typu čisté KCl, popř. směs KCl/NaCl (1 : 1).

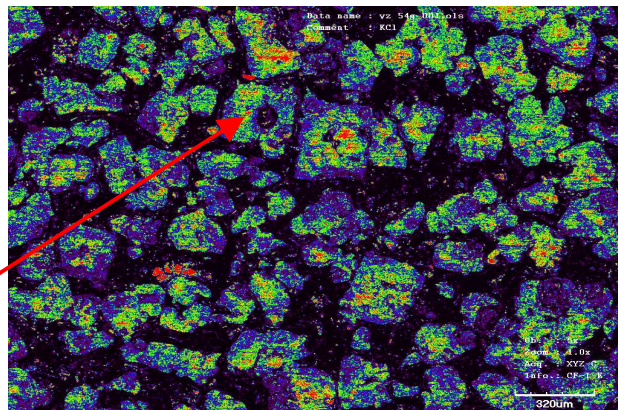
Rovněž byla vyzkoušena kompozitní směs KCl + 10 ÷ 30 % ZrSiO₄. Směs dosahuje velmi vysokých primárních pevností. Pevnosti po slisování se pohybují nad 9 MPa, při lisovací síle 100 kN a rychlosti zatěžování 4 mm/min, což značně převyšuje pevnostní hodnoty ST – jader s organickými pryskyřicemi (PUR Cold – Box). Chlorid draselný, jako anorganická sůl, zaručuje v této směsi rozpustnost. Zirkonsilikát má vysoké odolnosti vůči teplotám a zvyšuje pevnost celé směsi, avšak jako křemičitan je nerozpustný. V takovémto množství ZrSiO₄, jako je 30 %, je celková směs stále rozpustná ve vodě. Od jader z kompozitních směsí (ZrSiO₄, Al₂O₃) se očekává vyšší jakost povrchu odlitku i možnost aplikace lití kovů s vyšším bodem tavení.

Naproti tomu jádra z čisté soli KCl Standard jsou absolutně bezemisivní a ekologická. Pevnosti těchto jader z čisté KCl nejsou zanedbatelné a dosahují uspokojivých hodnot. Dosažené pevnosti v ohybu se pohybují nad 7 MPa, při vlhkosti směsi 0,60 %, lisovací síle 100 kN a při rychlosti zatěžování 4 mm/min. Dále je u ní zajištěna zaručená rozpustnost ve vodě.

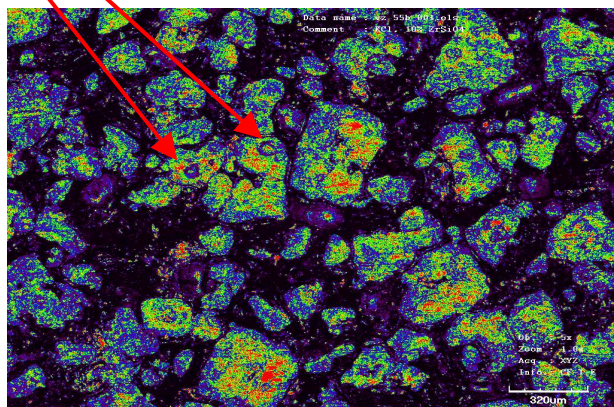
Obě tyto směsi velmi dobře odolávají atmosférickým podmínkám, a tudíž je zaručena i skladovatelnost jader.

Na obr. 40 – 42 jsou znázorněny mikrostruktury soli KCl a její směs s 10 a 30 % obsahem zirkonsilikátu.

Defekty na zrnech,
které jsou obklopeny
taveninou soli



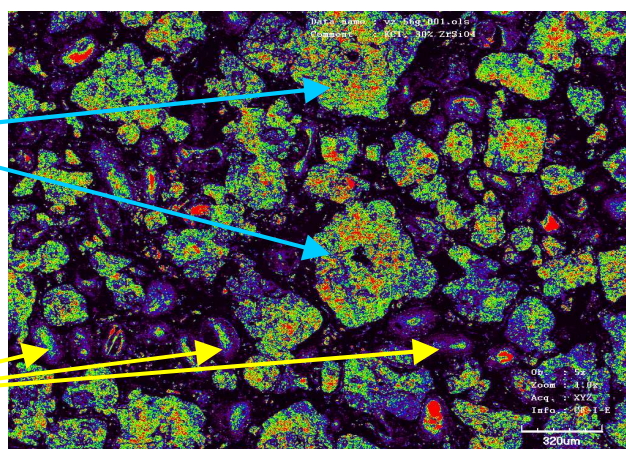
Obr. 40. KCl bez obsahu ZrSiO_4



Obr. 41. KCl +10 % ZrSiO_4

Natavená a
rekrytalizovaná
zrna

Částice ZrSiO_4
mezi roztavenou
solí



Obr. 42. KCl +30 % ZrSiO_4

7 ZÁVĚR

Byly sledovány pevnostní charakteristiky lisovaných jader z anorganických solí, především KCl, NaCl a jejich směsi. Vedle stupně zhuštění lisováním (max. lisovací síla 100 kN) tvaru zrn solí a granulometrie byl sledován i stupeň navlhčení a podmínky skladovatelnosti jader.

Dále byly měřeny primární pevnosti v ohybu, jakož i pevnosti sekundární za tepla (650°C) a zbytkové pevnosti, s cílem umožnit dodatečné opracování vylišovaných jader. Makroskopicky byly vysvětleny rozdíly v chování KCl a NaCl. Dosažené pevnosti jader v ohybu přes 8 MPa překonaly hodnoty běžných jader s organickými pojivy (Pur-Cold-Box).

V závěru práce byla ověřena možnost použití kompozitních směsí (KCl +10 ÷ 30 % ZrSiO₄), což otevírá cestu ke zdokonalení celé technologie a rozšíření i do oblastí tvarově složitých jader pro technologii tlakového lití automobilových odlitků.

8 POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] Stingl, P.; Schiller, G.: Gichte und rückstandsfreie Entkernung – Salzkerne für den Aluminiumguss. Giesserei-Erfahrungsaustausch, 2009, č. 6, s. 4 – 8.
- [2] Kaneko, Y.; Morita, A.: 6th SDCE international die casting congress. PAPER NO. 91, Cleveland, Ohio, November 16 – 19, 1970.
- [3] Loper, C. R.; aj.: The Use of Salt In Foundry Cores. AFS Transactions, 1985, 85 – 82, 545 – 560.
- [4] Jelínek, P.; Mikšovský, F.; Adámková, E.: Slévárenská jádra z anorganických solí. Mezinárodní slévárenská konference „Spolupráca“, Tatranská Lomnice, 28.-30. 4. 2010.
- [5] URL: <http://www.gasgoo.com/showroom/makechen> [cit. 2010-4-7]
- [6] URL: <http://www.almet.cz/povrchove-upravy-pistu.html> [cit. 2010-3-29]
- [7] URL: <http://www.almet.cz/slevarna.html> [cit. 2010-3-29]
- [8] URL: <http://www.saltcore.com.cn/en/group.asp> [cit. 2010-4-7]
- [9] URL: http://www.ogi.at/_pdfs/handouts/deutsch/Handout_Salzkerne_dt.pdf [cit. 2010-4-9]
- [10] URL: http://www.tradekey.com/product_view/id/758426.htm [cit. 2010-4-7]
- [11] URL: http://www.ceramtec.com/index/products/foundry_cores/00990,0144,0018,0329.php [cit. 2010-4-7]
- [12] URL: <http://www.almet.cz/vyvoj.html> [cit. 2010-4-7]
- [13] URL: <http://www.schaeferchemicals.com/45.0.html> [cit. 2010-4-7]
- [14] URL: <http://www.schaeferchemicals.com/34.0.html> [cit. 2010-4-7]
- [15] URL: http://www.esco-salt.com/en/presse/press_0008.html [cit. 2010-4-7]
- [16] URL: <http://news.directindustry.com/press/fritsch/laser-particle-sizer-analysette-22-microtec-plus-15376-332721.html> [cit. 2010-4-11]
- [17] URL: <http://webster.ncnr.nist.gov/userlab/pdf/E133fritschpulverisette.pdf> [cit. 2010-4-11]
- [18] URL: <http://zs.klasterecno.indos.cz/soubory/NaCl.ppt> [cit. 2010-4-12]